



ADDITÍV GYÁRTÁSSAL ELŐÁLLÍTOTT POLIMER FOGASKEREK MÉRLET-, ALAK- ÉS HELYZETPONTOSSÁGÁNAK VIZSGÁLATA KOORDINÁTAMÉRŐ GÉPEKEN

THE INVESTIGATION OF DIMENSIONAL, FORM AND ORIENTATION ACCURACY OF POLYMER GEARS PREPARED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Egyed-Faluvégi Erzsébet,¹ Gál Károly,² Farnos Rudolf-László,³ Kántor József,⁴
Gergely Attila⁵

*Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék,
Marosvásárhely, Románia*

¹ faluvegi.erzsebet@ms.sapientia.ro

² gal.karoly@ms.sapientia.ro

³ farnos_rudolf@ms.sapientia.ro

⁴ kantorjozsef@ms.sapientia.ro

⁵ agergely@ms.sapientia.ro

Abstract

Among the additive manufacturing techniques Fused Deposition Modeling (FDM) is a widely used process, due to its rapid development in the recent years, and its consequent drop in price. 3D printing has multiple process parameters, which affect the dimensional, form, and orientation accuracy, and thus the usability of the final product. In this work the effects of layer thickness, printing speed, and infill on the dimensional and geometric deviations were studied with a 3 factor Box-Behnken experimental design. The measured deviations were within the tolerance range specified by the standards. Based on this, it can be stated that 3D printing is a promising gear manufacturing technology for light and medium load applications.

Keywords: spur gear, 3D printing, additive manufacturing, accuracy, Box-Behnken.

Összefoglalás

Az additív gyártástechnológiák közül az ömledékrétegezés (Fused Deposition Modeling) 3D-nyomtatási technológia nagyon elterjedt, mivel az utóbbi évek során rohamos fejlődésen ment keresztül, és ez jelentős ár-csökkenéshez vezetett. A 3D-nyomtatásnak számos technológiai paramétere van, melyek hatása nagymértékben befolyásolja használhatóságát. 3 faktoros Box-Behnken kísérleti terv segítségével tanulmányoztuk a fogaskerek méret-, alak és helyzetpontosságát. Ez a három faktor a rétegvastagság, a nyomtatási sebesség és a kitöltési tényező. A kapott eredmények szerint a gyártott fogaskerek a szabvány által meghatározott tűrési tartományon belül voltak, mely alapján kijelenthetjük, hogy a 3D-nyomtatás egy ígéretes fogaskerékgyártó technológia lehet kis és közepes terhelések esetén.

Kulcsszavak: fogaskerék, 3D-nyomtatás, additív gyártástechnológia, pontosság, Box-Behnken.

1. Bevezetés

A fogaskerekes hajtások képezik a hajtástechnika egyik legfontosabb megoldását. A fogaskerékpár évről évre növekszik, és az előrejelzések szerint 2030-ra eléri a 218.7 milliárdos USD határt [1]. Különösen nagy igény van olyan fogaskerekre, melyek a kis és közepes terhelési tartományban használhatóak. Ilyen alkalmazásoknál a műanyag fogaskerek már kiválthatják a fém fogaskereket, hiszen számos előnnyel rendelkeznek: alacsony tömeg, könnyebb, gyorsabb és gazdaságosabb gyártás, csendesebb járás, ütések elnyelése és akár kenés nélküli működés is [2].

A műanyag fogaskerek gyártása additív gyártástechnológiával ígéretes alternatívát biztosít egyedi alkatrészek, illetve alacsony sorozatok gyártására [3]. Az ömledékretegezés (Fused Deposition Modeling, FDM) 3D-nyomatási eljárása most már elérhetővé teszi az átlagos felhasználó számára az egyedi alkatrészek otthoni gyártását. A technológia során egy műanyag szál (filament) vezetnek be egy fűtött egységbe (extruder), mely azt megömleszt, és egy mechanizmus síkbeli rétegeket hoz létre. A rétegek egymásba olvadásával a kívánt alkatrészt fokozatosan hozzuk létre. Az FDM-technológiának számos gyártási paramétere van, melyek kisebb-nagyobb mértékben befolyásolják a nyomtatott alkatrész felületi minőségét és geometriai pontosságát.

A munkánk célja vizsgálni az FDM 3D-nyomatási paraméterek közül a rétegvastagság, nyomtatási sebesség és a kitöltési tényező hatását az előállított műanyag fogaskerek méret-, alak- és helyzetpontosságára.

2. Kísérleti módszertan

2.1. Anyagok

A fogaskerek nyomtatása politejsav (PLA), Sunlu PLA Black 1510101A, $\phi 1.75$ mm átmérőjű filamentból történt.

2.2. 3D-s modell létrehozása

A fogaskerék 3D-s modellje a CATIA V5R17 tervezőszoftver Generative Shape Design moduljában került létrehozásra. A fogaskerék elemi fogazattal, 3 mm-es modullal, 21 darab foggal és $r_a = 29.6$ mm-es alapkörsugárral rendelkezik. Az evolvens fogprofil generálása az alábbi parametrikus egyenletek segítségével történt:

$$\begin{cases} x = r_a \sin \theta - r_a \theta \cos \theta \\ y = r_a \cos \theta + r_a \theta \sin \theta \\ z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Az evolvens mindössze egyszer került kigenerálásra, ezután tükrözés és körmintázat segítségével lett sokszorozítva.

2.3. Kísérleti terv

A 3 faktoros Box-Behnken kísérleti terv generálása a MiniTab 16 szoftverben történt. A választott paraméterek a rétegvastagság, nyomtatási sebesség és a kitöltési tényező voltak. A paraméterek határértékei előzetes kísérletek során kerültek meghatározásra. Az 1. táblázatban láthatóak a paraméterek három szintjéhez tartozó értékek. A kísérleti terv három centrális pontot tartalmaz.

1. táblázat. Box-Behnken kísérleti terv faktorainak értékei a három szinten.

Nyomatási paraméter	Alsó (-1)	Középső (0)	Felső (+1)
Rétegvastagság [mm]	0.1	0.15	0.2
Nyomatási sebesség [mm/min]	40	80	120
Kitöltés [%]	10	30	50

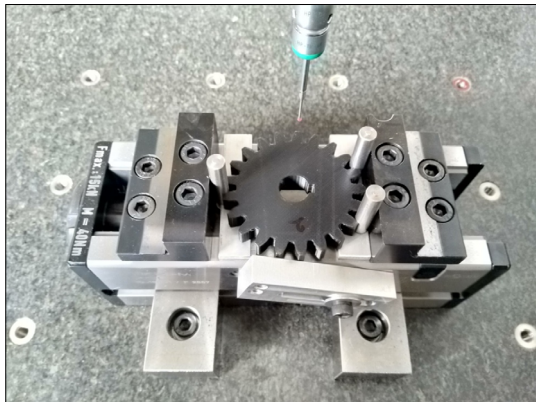
A tanulmányozott eredmények a fogaskerék bizonyos jellemzői: méretek szempontjából a fejkör- (D_a), lábkör- (D_d) és furatátmérők (D_f), az alak- és helyzetűrések közül pedig a homlokfelület síklapúsága (FLAT1), a tengelyfurat hengere (CYLY1), a fejkör (CIR1) és lábkör (CIR2) köralakúsága, a furat tengelyének merőlegessége a homlokfelületre (PERP1), illetve a fejkör (CONCEN1) és lábkör (CONCEN2) koncentrikussága a tengelyfurathoz képest.

2.4. 3D-s nyomtatás

Az additív gyártás egy Artillery Sidewinder X2 3D-nyomatóval lett megvalósítva. A fogaskerék modelljéből a nyomtatáshoz szükséges G-kód létrehozása a Prusa szeletelő programot használva történt. A szeletelés során alkalmazott sablon a 0.2 mm SPEED Prusa gyári sablon volt, így biztosítva, hogy csak az 1. táblázatban megjelölt paraméterek változtak. A nyomtatás során a fűtőka 210 °C, míg a tárgyasztal 60 °C hőmérsékleten volt, valamint a fogaskerek a méhsejt kitöltési formával készültek.

2.5. Méretellenőrzés koordinátamérő gépen

A koordinátamérés egy Hexagon Tigo SF-mérőgépen történt. A mérőgép egy közepes érzékenységű (medium force, MF) touch-trigger mé-



1. ábra. A fogaskerék befogva a készülékbe

rőcellával volt ellátva, illetve a tapintószár hossza 40 mm, a tapintógömb átmérője 2 mm volt. A mérés 18 ± 0.5 °C-on történt. A felvett pontokat illetően, síkok meghatározásához 12 pont (pl. homlokfelület), körvekhez 7 pont (fejkör és lábkör), hengerhez 25 pont került lemérésre. Minden idom illesztési eljárása a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazta. A nyers adatok feldolgozása a PC-DMIS 2019 szoftverben történt.

A mérőgép asztalán a fogaskerekre az 1. ábrán látható készülék segítségével kerültek befogásra. A fogak közé illesztett csapok felfeküdtek a satupofákra, ezáltal biztosítva egy következetes tájolást a munkadarabnak. Egy ütköző és egy távtartóként szolgáló mérőhasáb járult hozzá a fogaskerek lineáris pozíciójának pontos megtartásához.

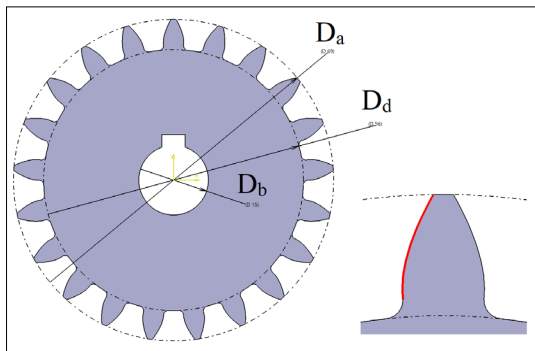
3. Eredmények

A 2. ábra mutatja a 3D-s modellt homloknézetben, valamint a generált evolvens fogprofil. Az ábrán bejelölt körök a fejkör (D_a , 69 mm), lábkör (D_b , 56 mm), valamint a tengelyfurat (D_f , 15 mm).

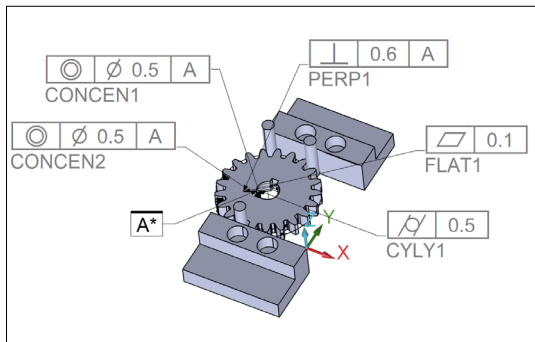
A vizsgált alak- és helyzettűrések és ezek tűrésértékei a 3. ábrán láthatóak.

A Box-Behnken-terv szerinti nyomtatási körülményeket a 2. táblázat tartalmazza. A 0.15 mm rétegvastagság, 80 mm/min nyomtatási sebesség és 30%-os kitöltés kombinációja háromszor fordul elő a táblázatban, mivel három centrális pontja van a kísérleti tervnek.

Összehasonlítás alapként az ISO 2768-cL szabványból származó értékek szolgáltak, a c - durva (méretek esetén) és L - durva (geometriai tűrések esetén) pontossági osztályokból. A 3. táblázatban szerepelnek a mért értékek intervallumai és a hozzájuk rendelt tűrésmezők.



2. ábra. A fogaskerék modelljének homloknézete. Az egyenletekkel generált evolvens profil piros színnel jelenik meg



3. ábra. A tanulmányozott alak- és helyzettűrések. Az A bázist a furat tengelye képezi.

2. táblázat. A 15 fogaskerék nyomtatási paramétereit.

No.	Rétegvastagság [mm]	Nyomtatási sebesség [mm/min]	Kitöltés [%]
1	0.15	120	50
2	0.1	120	30
3	0.15	80	30
4	0.2	80	10
5	0.1	80	10
6	0.2	80	50
7	0.15	40	50
8	0.1	80	50
9	0.15	80	30
10	0.2	120	30
11	0.15	120	10
12	0.15	80	30
13	0.15	40	10
14	0.2	40	30
15	0.1	40	30

3. táblázat. A tanulmányozott jellemzők mért értékei.

Jellemző	Mért érték [mm]	Tűrés* [mm]
Fejkörátmérő-eltérés (ΔD _a)	-0.449 - -0.072	±0.8
Lábkörátmérő-eltérés (ΔD _d)	-0.392 - -0.083	±0.8
Furatátmérő-eltérés (ΔD _b)	-0.126 - -0.01	±0.5
Síklapúság (FLAT1)	0.013 - 0.06	0.1
Hengeresség (CYLY1)	0.064 - 0.149	0.5
Merőlegesség (PERP1)	0.132 - 0.44	0.6
Koncentrikusság (furat-fejkör) (CONCEN1)	0.009 - 0.315	0.5
Koncentrikusság (láb-kör-fejkör) (CONCEN2)	0.045 - 0.354	0.5

* - az ISO 2768-cL szerint.

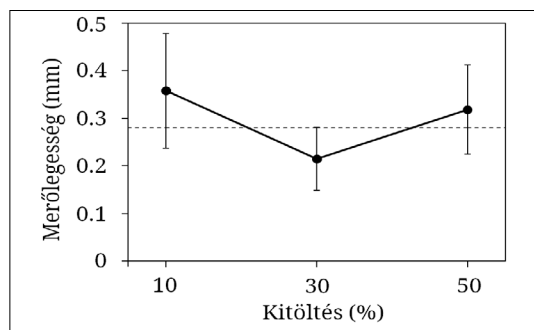
Mindhárom méret (D_a , D_d és D_b) kisebb volt, mint a nominális érték a 3D-s modellen. Ez a nyomtatást követő összehúzódásnak tudható be, és kompenzálni lehet azzal, hogy az alkatrészt 1-2%-kal nagyobbra tervezzük. Ami az alak- és helyzet-tűrésekkel illeti, a legnagyobb eltérések elérték a 0.3–0.45 mm-es tartományt, kivéve a síklapúságot, ahol az értékek egy nagyságrenddel kisebbek voltak. Mindazonáltal, az összes érték benne volt a tűrésmezőben.

A nyomtatási paraméterek befolyásának vizsgálata a méret- és formabeli eltérésekre a Box-Behnken kísérleti tervre alapuló válaszfelület-regresszióanalízis segítségével történt. Az eredményeken végzett ANOVA nem utalt szignifikáns hatásra. Az összes lineáris, négyzetes és interakciós tag közül mindössze a merőlegesség (PERP1) esetén jelentkezett statisztikai szignifikancia a 95%-os konfidencia-intervallumban, és ott is csak a kitöltés lineáris ($p = 0,048$), illetve négyzetes ($p = 0,03$) tagjainál. A regressziós modell módosított R-sq. értéke 51,04% volt ($R\text{-sq.} = 82,51\%$), ami jó illeszkedés az adathalmazhoz, és arra utal, hogy a modell legalább részben leírja a rendszer viselkedését. Ez volt a legmagasabb az összes módosított R-sq. érték között, amelyek amúgy a 0–30% között mozogtak. Az eredmények azt mutatták, hogy a merőlegességtől való eltérés 30% kitöltésnél a legkisebb, és megnő a szélső értékekben (4. ábra). A főhatás abszolút értékét tekintve látható, hogy a merőlegességi hiba lecsökkent 0,35 mm-ről 0,21 mm-re, ahogy a kitöltés 10%-ról 30%-ra nőtt, majd ismét felment 0,32 mm-re 50% kitöltésnél. Egy lehetséges magyarázat erre a jelenségre az,

hogy magas kitöltési értékeken a darab belsejében több anyag található, és ezért a zsugorodás és az ezzel járó feszültségek is nagyobbak, ezért a darab deformálódik. Ami az alacsony kitöltést illeti, a legyártott darab nagyrészt egy héjből áll, és ekkor a héjban keletkező hőjelenségek okozta feszültségek felülkerekednek az immár gyéren elhelyezett belső szerkezetek merevítő hatásán, ami ismét deformációhoz vezet.

Mindamелlett, hogy csak a PERP1 esetében volt szignifikáns a kitöltés hatása (4. ábra), a főhatásabrák a többi jellemző nagy részénél is azt mutatták, hogy 30%-os kitöltésnél a legalacsonyabb a hiba. Ez azonban véletlenszerűen is létrejöhetett. Más kutatások azt mutatják, hogy általában a rétegvastagság növelése a deformációk növekedéséhez vezet [4]. Ezt azzal magyarázzák, hogy nagyobb rétegvastagságnál a zsugorodás is megnő, főként függőleges irányban [5], és emiatt a feszültségek is megnőnek. Az általunk kapott adathalmazban növekvő és csökkenő trend is megfigyelhető, de szignifikancia hiányában ez is betudható a véletlen művének. A nyomtatási sebességet illetően pedig a szakirodalomban közölt eredmények elentmondásosak. Egyesek a sebesség növelésével a pontosság romlását [4], mások a javulását vélték felfedezni [6].

Egy másik tényező, amely nem került bele a tanulmányba, a nyomtatott darabok felületi érdessége. A rétegelés miatt kialakult érdességen kívül sorják is megjelennek, főként a függőleges felületeken (például a tengelyfuratban), amelyek akadályozhatják a mérőszondát. A fogaskerekek nem estek át semmilyen felületi kezelésem (a nagy sorják eltávolításán kívül, amelyek megakadályozták volna a mérést) azért, hogy a nyomtató által létrehozott felület minél jobban megőrződjön. Ezek a felületi elváltozások jelentős intenzitását zajt vihetek a mérési adathalmazba.



4. ábra. A PERP1 főhatásabrája

4. Következtetések

Következtetésként elmondható, hogy az FDM 3D-nyomtatási technológiával gyártott fogaske-rekek alak-, méret- és helyzetpontossága az ISO 2768-cL szabvány által meghatározott intervallumokon belül volt. Továbbá azt is megállapítottuk, hogy az FDM-eljárás a tanulmányozott határértékeken belül egy robusztus gyártási eljárásnak mondható, hiszen szignifikáns hatása kizárólag a kitöltési tényezőnek volt a merőlegességre.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gears, Drives and Speed Changers - Global Strategic Business Report. 2024.
https://www.researchandmarkets.com/reports/338745/gears_drives_and_speed_changers_global (letöltve: 2024. március)
- [2] Adams C. E.: *Plastics Gearing: Selection and Application*. 1st edition. CRC Press, New York, 1986.
- [3] Zhang Y., Mao K., Leigh S., Shah A., Chao Z., Ma G.:

A Parametric Study of 3D Printed Polymer Gears. Int J Adv Manuf Technol, 107. (2020) 4481–4492.

<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05270-5>

- [4] Cappellini C., Borgianni Y., Maccioni L., Nezzi C.: *The Effect of Process Parameters on Geometric Deviations in 3D Printing with Fused Deposition Modelling*. Int J Adv Manuf Technol, 122. (2022) 1763–1803.

<https://doi.org/10.1007/s00170-022-09924-4>

- [5] Elkaseer A., Schneider S., Scholz S. G.: *Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing*. Appl. Sci., 10. (2020) 2899.

<https://doi.org/10.3390/app10082899>

- [6] Agarwal K. M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R.: *Analyzing the Impact of Print Parameters on Dimensional Variation of ABS Specimens Printed Using Fused Deposition Modelling (FDM)*. Sensors International, 3. (2022) 100149.

<https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>